

溶接 HAZ 靱性評価のための CTOD 試験片採取のあり方

正員 豊田 政 男* 正員 南 二三吉*

Notch Orientation of CTOD Specimen for HAZ Toughness Evaluation

by Masao Toyoda, *Member* Fumiyoshi Minami, *Member*

Summary

HAZ CTOD tests have been carried out using two types of CTOD specimen, a through-thickness notched type and a surface notched type, extracted from multipass welds of HT50 steel for offshore structural use. The surface notch tends to sample one HAZ region at the crack tip, whereas the through-thickness notch intersects several regions in the HAZ. However, the surface notched specimen shows complicate fracture behavior especially when a stable crack growth occurs, which makes it difficult to measure the toughness of HAZ-microstructure at the fatigue precrack tip. By contrast, with the through-thickness notched specimen, the fracture toughness of the CGHAZ is evaluated practically because the initiation of cleavage fracture is controlled by the CGHAZ intersected by the crack tip. Critical CTOD of the HAZ-notched CTOD specimen decreases with increasing the total size of the CGHAZ along the crack front, which can be explained in terms of the weakest link effect of the CGHAZ. Bearing this size effect of CGHAZ in mind, the through-thickness notched specimen is more useful for the evaluation of the CGHAZ toughness of welds.

1. 緒 言

溶接構造物の構造安全性を確保しようとする観点から溶接部の靱性要求のあり方についても種々の検討が加えられており、例えば海洋構造物やパイプラインに対しては、従来からのシャルピー要求に加えてCTOD試験が課せられはじめた。それにつれて、最近の海洋構造物用鋼溶接部などで溶接ボンド部(HAZ粗粒域)の靱性が母材に比べて著しく劣化する傾向にあることが注目を集め、内外でこの方面の研究が多くなされている。

溶接部の靱性試験、とくに溶接HAZのCTOD試験を考えると、大きく分けて二つのタイプの試験片が用いられている。一つは板厚貫通切欠きをもち、き裂が溶接線方向に進展するもの(板厚貫通切欠き型試験片)、他の一つは切欠きが板厚表面から導入され、板厚方向にき裂が進展するもの(表面切欠き型試験片)である。前者の試験片は、溶接材料や溶接条件選定のための情報(特にHAZ靱性の下限的な値)を得ることを目的としており、

- ①海洋構造物用鋼溶接部の prequalification test¹⁻³⁾
 - ②潜在欠陥に対する情報がない場合の溶接部の general assessment⁴⁻⁵⁾
- などで使用されている。一方、後者の表面切欠き型試験片は、特定の欠陥からの破壊限界や特定のHAZ組織の靱性を評価する場合として、
- ① Fitness for purpose test⁴⁻⁵⁾
 - ② NPD (Norwegian Petroleum Directorate) 試験⁶⁾
- などにおいて推奨されている。

板厚貫通切欠き型試験片では、一般に切欠き前縁に様々なHAZ組織が存在するが、目標のHAZ組織が切欠き前縁に存在すればき裂は常にその組織をサンプルしながら進展する。これに対して、表面切欠き型試験片では、切欠き先端位置をうまく制御すれば切欠き前縁のほぼ全域を目標HAZ組織で占めることもできるが、一般に各HAZ組織のき裂進展方向の寸法が非常に小さいため、試験結果は切欠き先端位置のばらつきの影響を受けやすい^{7,8)}。本研究は、このような両タイプの試験片のCTOD試験結果の意義を明らかにし、HAZ靱性評価のための試験片採取のあり方について考察するものである。

* 大阪大学工学部

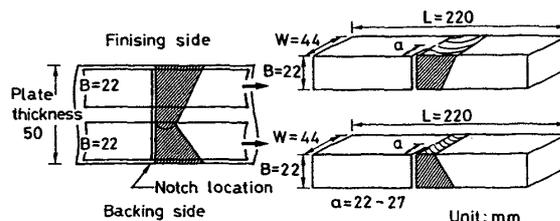
2. 実験

2.1 溶接継手の作製とCTOD試験片採取

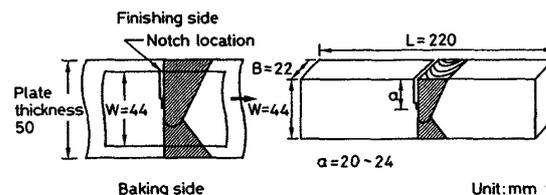
海洋構造物用 50 キロ級高張力鋼 (TMCP 型 HT 50) を母材とする多層溶接継手を, K型開先とX型開先にてサブマージアーク溶接によって作製した。溶接条件は両開先形状とも同じで, 入熱 Q は 30 kJ/cm で一定である。Table 1 に母材および溶接金属の化学組成と機械的性質, Table 2 に多層溶接条件を示す。溶接金属の強度は母材のそれよりやや高いが, ほぼ evenmatch の継手が得られている。Fig. 1 に作製した溶接継手からの CTOD 試験片採取の要領を示す。K開先継手からは板厚貫通切欠き型と表面切欠き型の両 CTOD 試験片を, X開先継手からは表面切欠き型 CTOD 試験片をそれぞれ約 20 本採取した。試験片の形状・寸法は全て同じで, 切欠き長さ a もほぼ同じ範囲にある。切欠き位置は, 板厚貫通切欠き型試験片では垂直ポンド部とし (fusion Line から 0.5 mm 以内を目標), 表面切欠き型試験片では finishing side に切欠きを設け切欠き先端が HAZ 粗粒域に位置することを目標とした。切欠き先端には疲労予き裂を長さ約 2 mm 導入してあり, 板厚貫通切欠き型試験片では機械加工の前にひずみ量 $0.5\% B$ (B : 試験片板厚) のプラテン加工を行った。本研究ではこれらの試験片を用いて脆性-延性遷移温度域内の一定試験温度 (-80°C) で三点曲げ破壊試験を行った。

2.2 多層 HAZ の組織分類

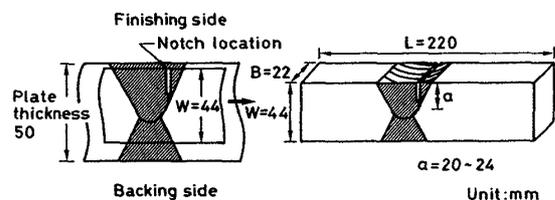
溶接 HAZ の CTOD 試験では, 切欠き先端が目標 HAZ



(a) Through-thickness notched specimen (K-groove)



(b) Surface notched specimen (K-groove)



(c) Surface notched specimen (X-groove)

Fig. 1 Extraction method and design for CTOD specimens used in experiments

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of HT50 steel and weld metal.

	Mechanical properties			Chemical composition (mass %)											
	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	El. (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Ti	B	Al
Base metal (HT50 steel)	444	517	33*	0.07	0.30	1.54	0.002	0.001	0.18	0.11	0.01	0.01	-	-	-
Weld metal SAW	472	546	25**	0.08	0.20	1.51	0.013	0.004	0.10	-	-	-	0.016	0.004	0.014

σ_y : Yield stress, σ_u : Ultimate tensile strength
 El.: Elongation (*: G.L.=70 mm, Specimen diameter=14 mm)
 (**: G.L.=32 mm, Specimen diameter=6 mm)

Table 2 Welding conditions for multipass welds.

	Pass no.	Welding process	Filler metal	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Groove Geometry (Unit:mm)
Backing side	1	SMAW	AWS A5.5* E7016-G	170±10	25±2	17±2	15	
	2~11	SAW	AWS A5.17** F7A8-EH14 / F7P8-EH14 (4mm Dia.)	550±20	30±2	33±1	30	
Finish-ing side	1~14	SAW	AWS A5.17** F7A8-EH14 / F7P8-EH14 (4mm Dia.)	550±20	30±2	33±1	30	

* Drying condition : $350^\circ\text{C} \times 1 \text{ hr}$
 ** Drying condition : $200\text{--}300^\circ\text{C} \times \text{Min.} 1 \text{ hr}$

に正しく位置するように試験片を準備する必要がある。このため、溶接継手からの試験片の採取に先立って、継手断面の HAZ 組織分布の調査を行った。

本研究では、溶接熱サイクルの最高到達温度 T_p を指標として HAZ の組織分類を行った。まず、単層溶接の HAZ が次の四つの組織¹⁾²⁾

- i. 粗粒 HAZ (CGHAZ) : $T_p \geq 1150^\circ\text{C}$
- ii. 細粒 HAZ (FGHAZ) : $1150 > T_p \geq 900^\circ\text{C}$
- iii. 二相域 HAZ (ICHAZ) : $900 > T_p \geq 700^\circ\text{C}$
- iv. 未変態 HAZ (SGHAZ) : $700 > T_p \geq 600^\circ\text{C}$

に分類できるものとし、多層溶接ではさらに後続パスによる再加熱効果を考慮して Table 3 に示すように HAZ 組織を分類した。なお、多層溶接の場合は後続パスの T_p がある温度域に入ると CGHAZ の靱性が回復することが報告されている⁹⁾¹⁰⁾そこで本研究ではその点も考慮に入れて、後続パスの T_p が $450 \sim 600^\circ\text{C}$ となる領域をテンパー領域と定義することにした。

Fig. 2 にこのような定義に従って分類した継手断面の HAZ 組織の分布状態を示す。本供試継手では、特に K 開先の場合に、板厚表面部を除けば全ての CGHAZ は後続パスによるテンパー領域に入っていることがわかる。本研究では Fig. 2 に基づいて、切欠き先端が CGHAZ に位置するように CTOD 試験片を採取した。

なお、組織分布決定のために用いる溶接熱サイクルのピーク温度 T_p は、溶接ビードを厚板中に置かれた瞬間線熱源と仮想して、次式¹¹⁾

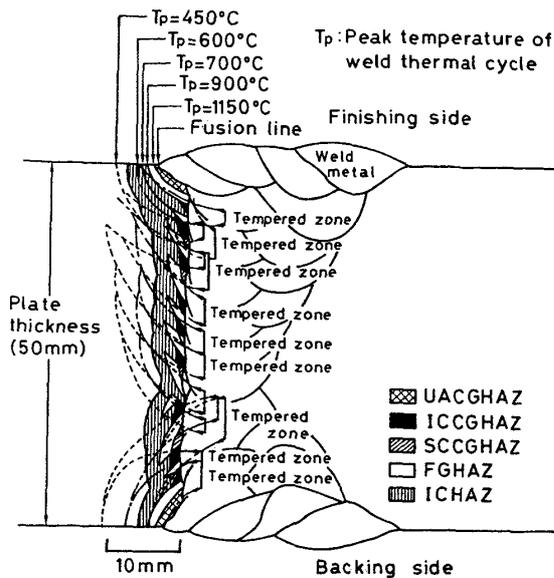
$$\frac{r}{d_{HAZ}} = \frac{\sqrt{900 - T_0}}{\sqrt{T_p - T_0}} \cdot \frac{\sqrt{T_{mp} - T_0} - \sqrt{T_p - T_0}}{\sqrt{T_{mp} - T_0} - \sqrt{900 - T_0}}$$

によって算出した。ここで、 r は fusion line からの垂直距離、 d_{HAZ} はエッチングによって観察された HAZ 幅、 T_{mp} 、 T_0 はそれぞれ母板の溶融温度 ($T_{mp} = 1530^\circ\text{C}$ とした)、初期温度 ($T_0 = \text{パス間温度}$ とした) である。なお、腐食液には 5% ナイタルを用い、それによって腐食される HAZ 境界の最高到達温度を 900°C (A_{c3} 変態温度) と仮定した。

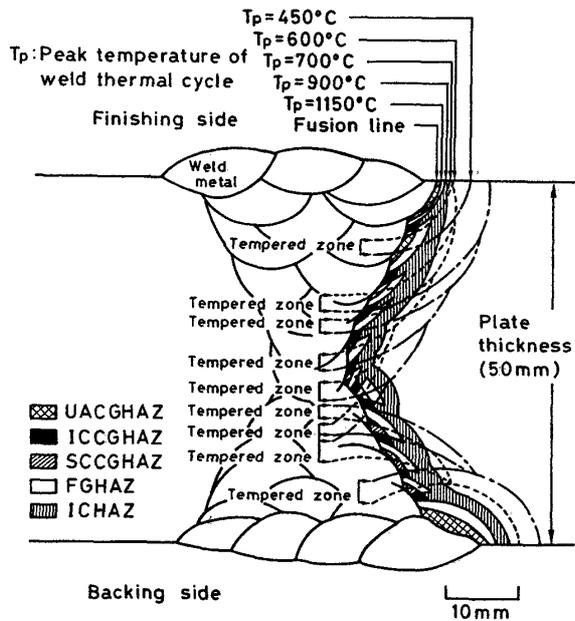
Table 3 Terminology of HAZ-microstructures of multipass welds.

T_p by 1st cycle	T_p by 2nd cycle	T_p by subsequent cycle	
		450°C ~ 600°C	600 ~ 450°C
$T_{mp} \sim 1150^\circ\text{C}$ (CGHAZ)	$T_{mp} \sim 1150^\circ\text{C}$	UACGHAZ	Tempered CGHAZ
	1150 ~ 900°C		FGHAZ
	900 ~ 700°C	ICCGHAZ	Tempered CGHAZ
	700 ~ 600°C	SCCGHAZ	
	600 ~	UACGHAZ	
1150 ~ 900°C (FGHAZ)	$T_{mp} \sim 1150^\circ\text{C}$	UACGHAZ	Tempered CGHAZ
	1150 ~ 900°C		FGHAZ
	900 ~ 700°C		ICHAZ
	700 ~		FCHAZ
900 ~ 700°C (ICHAZ)	$T_{mp} \sim 1150^\circ\text{C}$	UACGHAZ	Tempered CGHAZ
	1150 ~ 900°C		FGHAZ
	900 ~		ICHAZ

T_p : Peak temperature by weld thermal cycle
 T_m : Melting point of the material



(a) K-groove multipass welds



(b) X-groove multipass welds

Fig. 2 Identification of HAZ regions in the cross-section of welds.

3. 破壊限界 CTOD に及ぼす切欠き導入位置の影響

-80°C の一定試験温度で得られた HAZ 切欠き試験片の限界 CTOD を、破壊様式も区別してヒストグラムにして Fig. 3 に示す。 δ_c 、 δ_u 、 δ_m の記号は BS 5762 に準じており、本実験の場合、最終的に脆性破壊を呈したもの (δ_c 、 δ_u のものは全て第 1 段で試験片全体が破壊した。Fig. 4 は、限界 CTOD の累積分布特性をみるために、Fig. 3 の結果を Weibull 確率紙にプロットしたものである (実験を行った試験片数全体を母集団として、 δ_c と δ_u のデータだけをプ

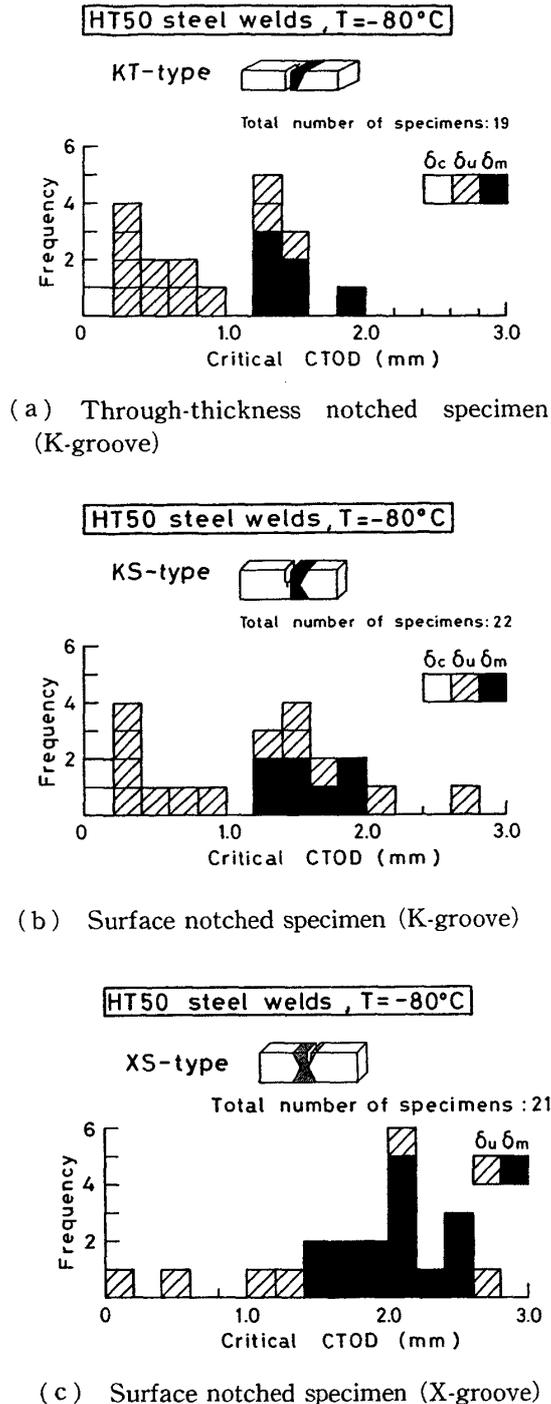


Fig. 3 Histogram of critical CTOD value of HAZ-notched specimens.

ロットした)。K開先継手から採取した試験片では、脆性破壊の出現割合や限界CTODの分布は試験片タイプによらずほぼ同じであるが、X開先継手から採取した表面切欠き型試験片では多くものが完全延性破壊を呈し、脆性破壊に対する限界CTODもK開先継手の場合に比べて全体に高くなっている。

このような溶接HAZの破壊限界CTODは、試験片の切欠き先端がどの組織に位置したかによって大きく左右される。Fig. 4の限界CTOD分布も見かけ上のものといえ、そ

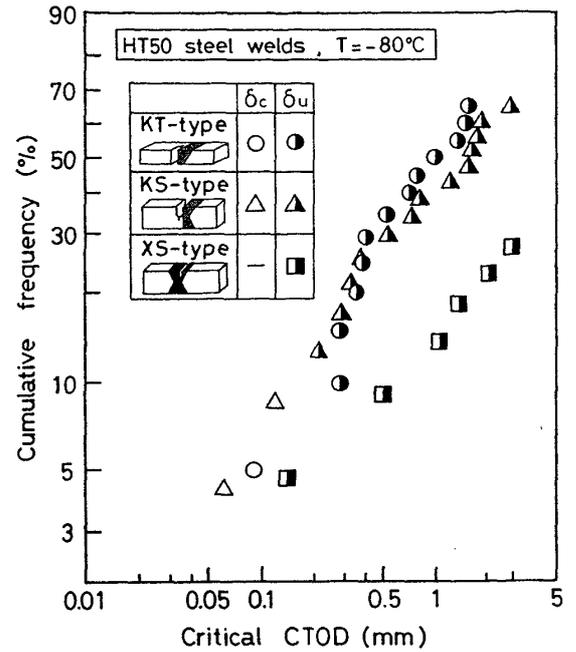


Fig. 4 Cumulative Weibull plot of critical CTOD value of HAZ-notched specimens.

の意義を明らかにする目的から実験を行った全ての試験片についてセクションングを行い、切欠き先端近傍のHAZ組織との関連から考察を加える。

4. HAZ切欠きCTOD試験結果の意義の考察

4.1 破壊発生を支配する組織

本実験では次のような要領でセクションングを実施した。板厚貫通切欠き型試験片については、API RP 2Zに示されているように疲労予き裂面をき裂先端近傍で切欠き前縁に平行に切断し、その断面での情報からき裂前縁に沿う組織分布を決定した。一方、表面切欠き型試験片に関しては、破壊発生点の組織をなるべく正確に把握する目的から、Fig. 5に示すように破面を破壊発生点で切断し、切欠き前縁に垂直なA-A'断面の組織分布を観察した⁴⁾。後者の場合、切欠き前縁の組織分布も把握するには、破面をいくつかの断面で切断して一連のセクションングを行う必要がある。しかし、本供試継手ではFig. 5に模式的に示すように、試験片板厚寸法の範囲内ではHAZ組織は溶接線方向にほぼ平行であったので、き裂前縁形状とA-A'断面のセクションング結果とを照合してき裂前縁の組織分布を推定するという手法を採った。ただし、完全延性破壊を呈したものは切欠き周りの変形量あまりにも大きいため、セクションングによってき裂先端近傍の組織の同定をすることはできなかった。

Figs. 6, 7に、K開先継手から採取した全試験片のセクションング結果を限界CTODの大ききの順に並べて示す。Fig. 6は板厚貫通切欠き型試験片の結果で、切欠き前縁に沿う組織分布を示しているが、▽印と▼印で破壊発生点の

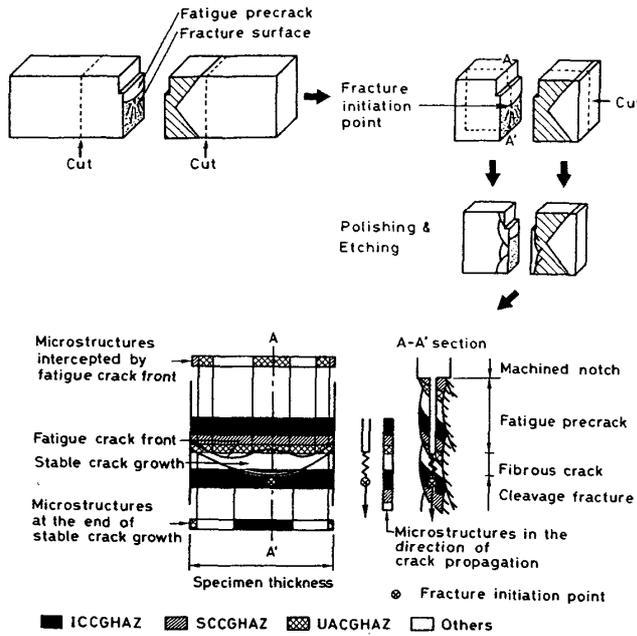


Fig. 5 Sectioning technique for identification of microstructures along and in the vicinity of crack tip for surface notched specimen.

位置をプロットしてあるように (▽印は完全へき開破壊の発生点, ▼印は延性き裂成長後のへき開破壊発生点), ほとんどの場合へき開破壊は HAZ 粗粒域 (CGHAZ) から発生していた。なお, 文献¹²⁾¹³⁾によると, CGHAZ のうちでも二相域に再加熱された ICCGHAZ からの破壊発生が最も支配的であることが報告されているが, 本供試継手の場合は ICCGHAZ から選択的に破壊が発生する傾向は特に認められなかった。

一方 Fig. 7 は, 表面切欠き型試験片の場合のセクションニング結果で, (a) 図に破壊発生点を含む面 (A-A' 面) のき裂進展方向の組織分布を, (b) 図にそれを基に推定した疲労き裂前縁の組織分布を示している。(延性き裂成長を伴うへき開破壊を呈したものについては, へき開破壊に移行する直前の延性き裂の組織分布も推定した。疲労き裂前縁の組織分布と延性き裂前縁の組織分布を ↓印をはさんで対にして示す。)(b) 図に見るように, 表面切欠き型試験片では疲労き裂前縁が単一の組織で占められる傾向にあり, き裂先端がうまく CGHAZ に当たればき裂前縁のほぼ全域を CGHAZ で覆うことも可能である。したがって, 目標とする HAZ 組織の靱性が非常に低くてき裂先端から直接へき開破壊が生じるような場合は, その組織自身の特性が把握できるということになる。しかし, (a) 図に示すように, たとえ疲労き裂先端が CGHAZ に位置していても延性き裂が発生すると, それが大きく成長してき裂先端の CGHAZ を通り抜け, ねらった CGHAZ からへき開破壊が生じない場合がある。またその逆に, き裂先端が FGHAZ のような靱性良好域にあっても, き裂先端近傍に CGHAZ が存在するとそこからへき開破壊が発生して見かけ上小さな限界 CTOD が出現することもある。これらの結果より, 表面切欠き型試験片では, 測定された破壊限界 CTOD は必ずしもき裂先端の組織の靱性を代表するとは限らないと言える。

4.2 破壊限界 CTOD に及ぼすき裂前縁の CGHAZ 寸法の影響

本実験の CTOD 試験片では切欠き先端近傍に存在する CGHAZ からのへき開破壊がほとんどであったので, 次に破壊限界 CTOD が切欠き先端の CGHAZ 寸法とどのように関係するかについて検討する。

CGHAZ 寸法と限界 CTOD の関連については, これまでに次のような定義の CGHAZ 寸法に注目した検討がなされている。

- ①き裂前縁に存在する CGHAZ の最大寸法 $l_{max}^{12)}$
- ②破壊発生点が存在していた CGHAZ の寸法 $l_F^{13)}$
- ③き裂前縁に沿う CGHAZ の総寸法 $l_{CGHAZ}^{14)15)}$

③の CGHAZ 総寸法 l_{CGHAZ} は, HAZ 切欠き試験片の限界 CTOD は CGHAZ 靱性の最小値によって決まるという確率論的観点に立って著者らが既に提案しているもので, 本研究でも l_{CGHAZ} を指標にとって検討を行う。

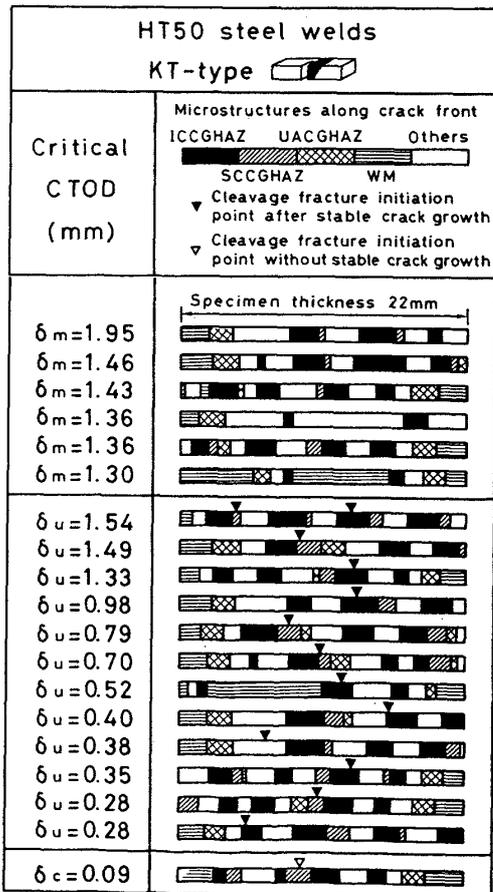
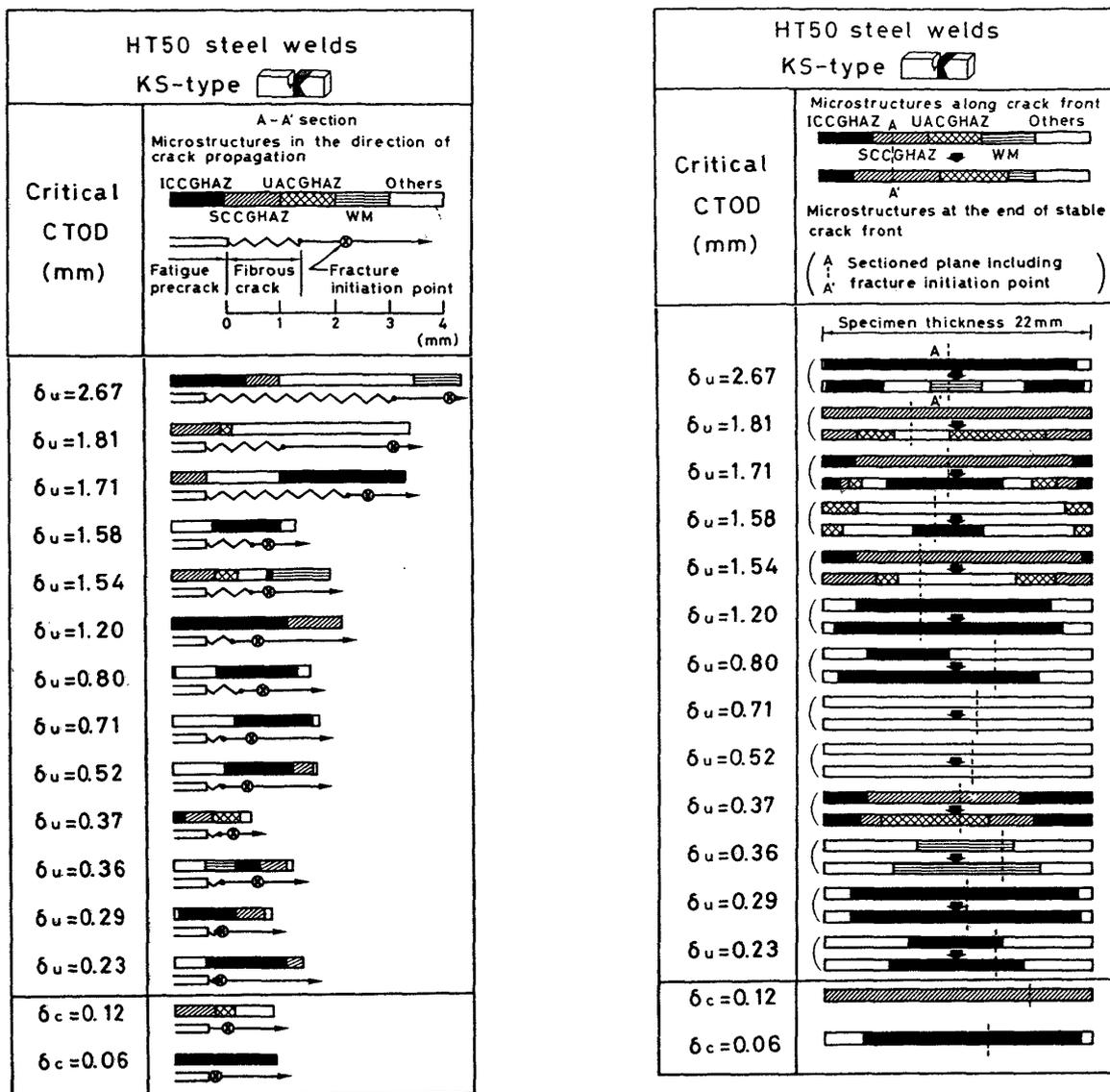


Fig. 6 Distribution of microstructures along crack front and postulated location of cleavage crack initiation for through-thickness notched specimen (K-groove).



(a) Variation of microstructures in the direction of crack propagation.

(b) Estimated distribution of microstructures along fatigue crack front and at the end of stable crack growth.

Fig. 7 Sectioning results for surface notched specimen (K-groove).

Fig.8にCGHAZ総寸法 l_{CGHAZ} の算定の仕方を示す。板厚貫通切欠き型試験片では、(a)図に示すように l_{CGHAZ} は比較的容易に測定できる。しかし、表面切欠き型試験片の場合は l_{CGHAZ} の測定は容易でなく、本研究では(b)図に示すように、試験片板厚の範囲内ではHAZ組織は溶接線方向にほぼ平行であることを利用して、破壊発生点を含む断面(A-A'断面)のセクションング結果と疲労き裂前縁形状を照らし合わせることで l_{CGHAZ} を算定することにした。

Fig.9に、K開先継手から採取した試験片について、破壊限界CTODとCGHAZ総寸法 l_{CGHAZ} の関係を整理した結果を示す。板厚貫通切欠き型試験片ではほとんどの場合 l_{CGHAZ} は約10mm付近の狭い範囲にあり、比較的管理され

たK開先多層継手ではいくつかの試験片に対してほぼ一定の l_{CGHAZ} を確保することが可能であることを示唆している。しかし、表面切欠き型試験片では、 l_{CGHAZ} は0~22mm(=試験片板厚)と広範囲にわたっており、切欠き先端位置のばらつきの影響が大きい。

著者らはこれまでに、HAZ切欠き試験片の限界CTODは l_{CGHAZ} の大きなものほど全体に小さくなる傾向にあることを報告したが¹⁴⁾、本実験結果の場合にはその傾向が明確でない。これはFig.7で述べたように、表面切欠き型試験片では破壊が切欠き先端の組織から発生するとは限らないためである。そこで、Fig.9においてこのような破壊挙動を呈した試験片の限界CTODを()で示し、これらのデータを除いて考えると、図中に破線でばらつきの上下線を示し

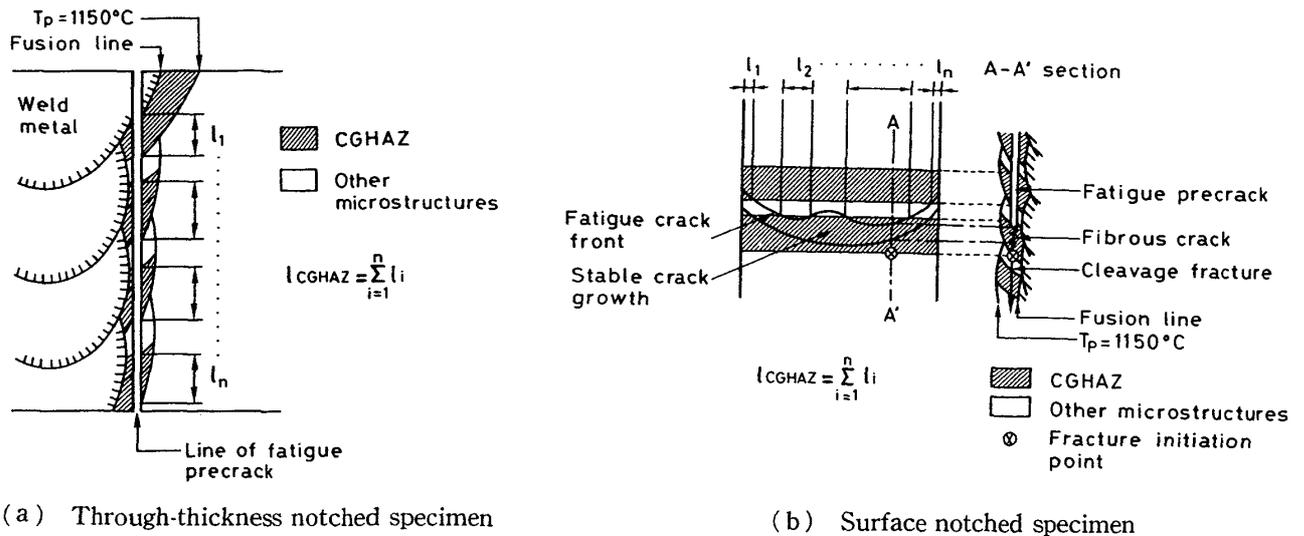


Fig. 8 Definition of total CGHAZ size l_{CGHAZ} intersected by crack front.

たように、 l_{CGHAZ} の大きなものでは全体に小さな限界 CTOD を呈しており、これまでと同様な傾向にあることがわかる。

4.3 HAZ 靱性評価のための試験片採取と試験データの解析法

本研究の結果をふまえて、HAZ 切欠き試験片の試験データの特性についてまとめてみると次のようになる。

板厚貫通切欠き型試験片：切欠き前縁を全て CGHAZ で占有させることはできないが、板厚方向のパス数に近い数だけを CGHAZ をサンプルすることができ、切欠き前縁の CGHAZ 総寸法 l_{CGHAZ} のばらつきはそう大きくない。へき開破壊はほとんどの場合切欠き前縁の CGHAZ から生じ、測定された限界 CTOD には CGHAZ 自身の靱性が反映される。

表面切欠き型試験片：切欠き先端をうまく CGHAZ に当てれば切欠き前縁のほぼ全域を CGHAZ で覆うことも可能であるが、そのためには切欠き導入の厳密な制御が必要で、一般には数多くの試験片を必要とし容易でない。しかも、延性き裂成長などのために破壊が予き裂先端の組織から生じない場合があり、得られた限界 CTOD は常に予き裂先端の組織の靱性を代表するとは限らない。

X 開先継手から採取した試験片において、切欠き先端位置の目標を CGHAZ としたにもかかわらず多くのものが完全延性破壊したのは、上述の予き裂先端からの延性き裂成長が原因していると考えられる。すなわち、K 開先の場合は延性き裂が成長して予き裂先端の CGHAZ を通り過ぎて、次のパスの CGHAZ からへき開破壊が発生する機会があるのに対して、X 開先の場合は延性き裂が CGHAZ を通り抜けるともはや成長き裂先端近傍には低靱性領域が存在せず、へき開破壊を起こしにくい。

以上の理由から、表面切欠き型試験片の靱性データの取

扱い方には注意が必要であり、溶接 HAZ の靱性、特に CGHAZ の靱性を評価するという目的からは板厚貫通切欠き型試験片の方が適していると考えられる。しかし、Fig. 9 で見たように、切欠き前縁の CGHAZ 総寸法 l_{CGHAZ} が一定の範囲にあっても限界 CTOD に大きなばらつきが認められるので、次にこの限界 CTOD のばらつき特性の解析の仕方について検討する。

Fig. 10 は、K 開先継手から採取した試験片において予き裂前縁の CGHAZ 総寸法 l_{CGHAZ} が一定の範囲にあったデータ (板厚貫通切欠き型試験片： $l_{CGHAZ}=9\sim 13$ mm, データ数は δ_m も入れて 15, 表面切欠き型試験片： $l_{CGHAZ}=18\sim 22$ mm, データ数は 8) を一つのグループとみなして、その限界 CTOD を累積分布の形に再整理したものである。(表面切欠き型試験片でへき開破壊が切欠き先端の CGHAZ か

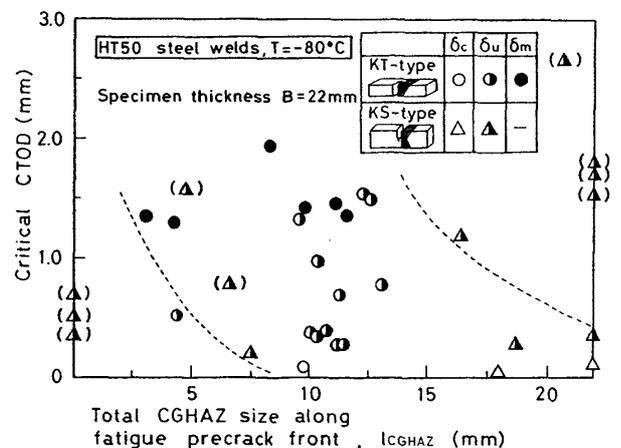


Fig. 9 Relationship between critical CTOD value and total CGHAZ size l_{CGHAZ} for HAZ-notched specimens (K-groove).

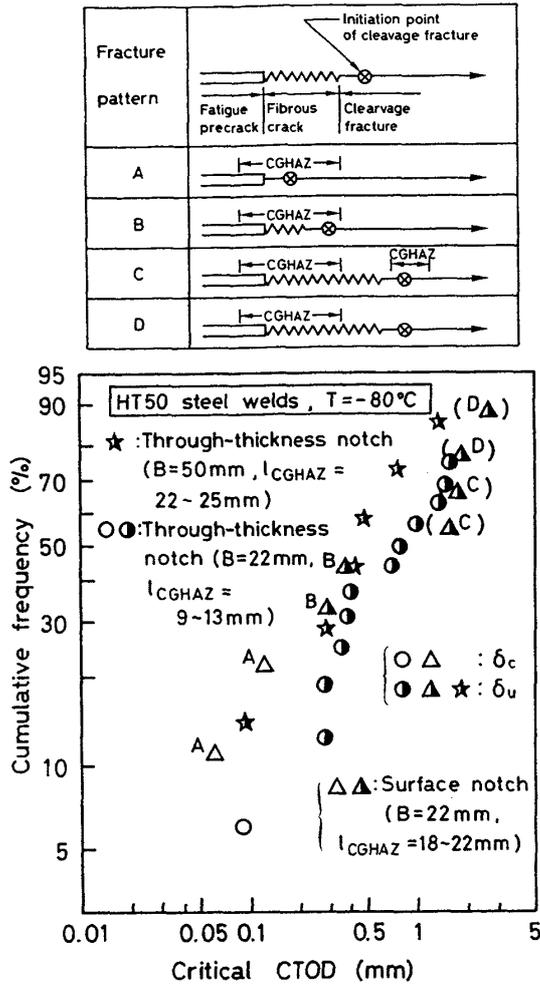


Fig. 10 Comparison between CTOD distributions for through-thickness notched and surface notched specimens.

ら発生しなかったものについては限界 CTOD を () で示した。) なお、文献¹⁴⁾で報告した、本供試溶接継手と同一の継手から採取した全厚の板厚貫通切欠き型試験片 ($B=50\text{mm}$) のデータも合わせて★印でプロットした。これを見ると、 l_{CGHAZ} の大きなグループでは同一累積頻度での限界 CTOD が小さくなっていることがわかる。

このような限界 CTOD 分布の l_{CGHAZ} への依存性について、次のような仮定の下に最弱リンクモデルによる解析を行う。

仮定 1) HAZ 切欠き試験片の破壊限界 CTOD は、切欠き前縁に存在する CGHAZ の靱性の最小値によって決まる。

仮定 2) 切欠き前縁に存在する CGHAZ は互いに統計的に独立である。

最弱リンクモデルによると、限界 CTOD の l_{CGHAZ} への依存性は次式で与えられる¹⁴⁾。

$$F_l(\delta_c) = 1 - [1 - F_{l_0}(\delta_c)]^{l/l_0}$$

ここで、 $F_l(\delta_c)$ と $F_{l_0}(\delta_c)$ は、それぞれ CGHAZ 総寸法が l

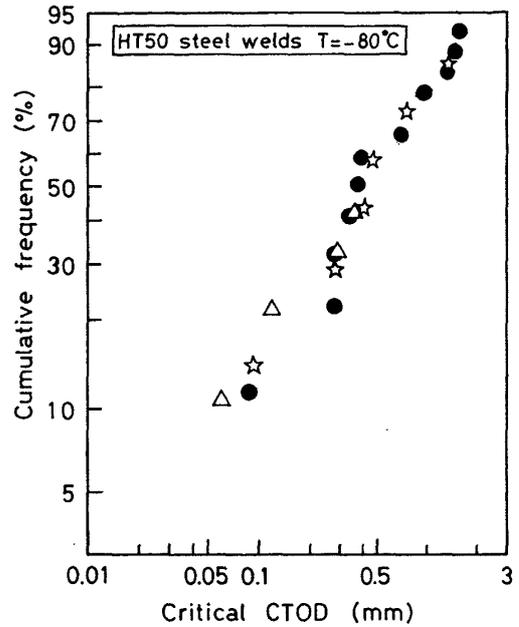
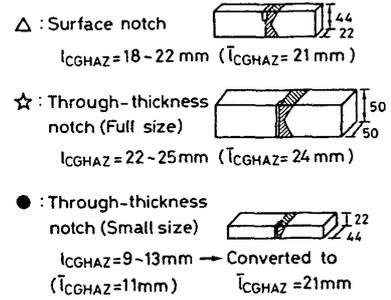


Fig. 11 Prediction of CTOD distribution for surface notched specimen from test results of through-thickness notched specimen based on the weakest link model.

と l_0 である試験片の限界 CTOD 分布 (累積分布) である。

Fig.11 は、上式を用いて、 l_{CGHAZ} の平均値 \bar{l}_{CGHAZ} が 11mm のグループ (板厚貫通切欠き型試験片) の限界 CTOD を $\bar{l}_{\text{CGHAZ}} = 21\text{mm}$ のグループ (表面切欠き型試験片) の値に換算したものである。これを見ると、換算された限界 CTOD 分布 (●印) は $\bar{l}_{\text{CGHAZ}} = 21\text{mm}$ の表面切欠き型試験片の実験データ (△印) とよい一致を示しており、しかも $\bar{l}_{\text{CGHAZ}} = 24\text{mm}$ の全厚の板厚貫通切欠き型試験片のデータ (★印) とも非常によく一致している。この結果は、切欠き先端に存在する CGHAZ からへき開破壊が発生する場合は、切欠き導入位置や試験片板厚によらず、限界 CTOD 分布は切欠き前縁の CGHAZ 総寸法の最弱リンク効果で統一的に説明できることを示している。

板厚貫通切欠き型試験片の CTOD 試験結果に及ぼす CGHAZ 総寸法 l_{CGHAZ} の影響の解析例は文献¹⁴⁾¹⁵⁾でも発表しており、最弱リンクの考え方はほぼ妥当であることを確かめている。

このように、HAZ 切欠き試験片の限界 CTOD のばらつ

き特性は切欠き前縁に占める CGHAZ の寸法効果で解析することができ、CGHAZ 寸法 l_{CGHAZ} が小さくてもその試験データから、切欠き前縁が全て CGHAZ で覆われた場合の限界 CTOD を予測できることが明らかとなった。ただし、表面切欠き型試験片を用いる場合は試験結果の取扱い方に注意が必要で、CGHAZ の靱性を評価するという立場からは、上記の寸法効果に留意さえすれば板厚貫通切欠き型試験片の方が適していると判断される。

5. 結 論

溶接 HAZ 靱性評価のための CTOD 試験片採取のあり方について検討するために、50 キロ級高張力鋼を母材とする多層溶接継手を作製し、板厚貫通切欠き型と表面切欠き型の二つのタイプの CTOD 試験片を採取して一定の試験温度で三点曲げ破壊試験を行った。両タイプの試験データの特性をセクショニングで得られた切欠き先端近傍の組織と対比させながら考察した結果、次のような結論が導かれた。

- (1) 板厚貫通切欠き型試験片では、へき開破壊の発生が切欠き前縁に存在する HAZ 粗粒域 (CGHAZ) に支配される傾向にあり、測定された限界 CTOD には CGHAZ の靱性が反映される。これに対して表面切欠き型試験片では、延性き裂成長などのために必ずしも切欠き先端からへき開破壊が生じるとは限らず、得られた限界 CTOD も切欠き先端の組織の靱性を代表するとは限らない。このため、表面切欠き型試験片の試験データの取扱いには十分注意する必要がある。
- (2) HAZ 切欠き試験片の破壊限界 CTOD は、切欠き前縁に沿う CGHAZ の総寸法 l_{CGHAZ} に依存し、 l_{CGHAZ} の大きなものほど限界 CTOD の値が全体に小さくなる傾向にある。これは、最弱リンクモデル的な切欠き前縁の CGHAZ の寸法効果で説明することができ、切欠き導入位置の違いや試験片板厚の差による限界 CTOD 分布の相違もほぼこの考え方で説明できる。
- (3) 以上の点から、溶接 HAZ の靱性、特に CGHAZ 靱性の評価のためには、表面切欠き型試験片よりも板厚貫通切欠き型試験片の方が適していると判断され、たとえ実験に用いた試験片の l_{CGHAZ} の寸法が十分でなくても、(2) の解析法を適用すれば切欠き前縁が全て CGHAZ に覆われた場合の限界 CTOD を推測することができる。

謝 辞

本研究は北欧との共同研究プロジェクト“SPRÖDZON”の一部としてなされたもので、供試継手の作製にあたっては NKK 鉄鋼研究所の各位から多大なご配慮とご援助を賜った。また一部は、平成元年度科学研究費補助金による試験研究(1) (課題番号 63850156) として実施した。ここに記して深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) API RP 2Z: Recommended Practice for Pre-production Qualification for Steel Plates for Offshore Structures, (1987).
- 2) Fairchild, D. P., Theisen, J. D. and Royer, C. P.: Philosophy and Technique for Assessing HAZ Toughness of Structural Steels Prior to Steel Production, Proc. 7th Int. Conf. OMAE, Houston, 3 (1988), 247-255.
- 3) EEMUA Publication No. 150: Steel Specification for Fixed Offshore Structures (Adapted for Offshore from BS4360: 1986), (1987).
- 4) Squirrell, S. J., Pisarski, H. G. and Dawes, M. G.: Recommended Procedures for the Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Testing of Weldments, The Welding Institute, Doc. 7807.02/86/485.2, (1986).
- 5) ASTM E24: Recommended Practice for Fracture Toughness Testing Weldments, (1987).
- 6) Thaulow, C. and Paauw, A. J.: Materials Characterization with Respect to HAZ Local Brittle Zones, WELDTECH'88, London, (1988).
- 7) 貝原, 村山, 河野, 深川: 低温用鋼溶接部の限界 COD 値のばらつきに関する一考察, 溶接学会論文集, 2 (1984), 104-112.
- 8) JPVRC: Metallurgical Investigation on the Scatter of Toughness in the Weldment of Pressure Vessel Steels, (1985).
- 9) Nakano, Y., Amano, K., Kudo, J. and Kobayashi, E.: Preheat-and PWHT-Free 150mm Thick API 2W Grade 60 Steel Plate for Offshore Structures, Proc. 7th Int. Conf. OMAE, Houston, 3 (1988), 89-94.
- 10) Haze, T. and Aihara, S.: Influence of Toughness and Size of Local Brittle Zone on HAZ Toughness of HSLA Steels, Proc. 7th Int. Conf. OMAE, Houston, 3 (1988), 515-523.
- 11) 中尾, 大重, 野井: 高張力鋼多層盛溶接熱影響部の組織分布, 溶接学会論文集, 3 (1985), 766-781.
- 12) 豊貞, 萩原, 野原, 大塚: 溶接継手の限界 CTOD とその板厚効果について, 日本造船学会論文集, 159 (1986), 330-339.
- 13) 土師, 粟飯原, 萩原, 内野, 川島, 富田, 千々岩: 高張力鋼溶接部限界 COD 値に及ぼす諸影響因子の検討, 日本造船学会論文集, 162 (1987), 424-432.
- 14) Minami, F., Toyoda, M. and Satoh, K.: Probabilistic Analysis of Fracture Toughness of Weld HAZ with LBZ, Trans. Japan Welding Society, 19 (1988), 125-133.
- 15) Toyoda, M. and Minami, F.: Evaluation Procedure of Structural Reliability of Weldments Based on CTOD Results, Proc. 8th Int. Conf. OMAE, The Hague, 3 (1989), 717-724.